

ФИЗИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 537.523

**СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМОТРОНА
С ИНДУКЦИОННЫМ РАЗРЯДОМ
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ****А. Н. Власов**, д.т.н., профессор кафедры ОиЭФ РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0002-6298-0433, e-mail: oief@rsreu.ru

М. В. Дубков, д.т.н., заведующий кафедрой ОиЭФ РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0002-5791-0991, e-mail: oief@rsreu.ru

Ю. В. Черкасова, к.т.н., доцент кафедры ОиЭФ РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0003-2474-3629, e-mail: oief@rsreu.ru

А. В. Николаев, старший преподаватель кафедры ОиЭФ РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0001-7603-7094, e-mail: oief@rsreu.ru

Создан и исследован макет импульсного плазмотрона, содержащий полукрытую цилиндрическую камеру, в которой устанавливаются электрически взрывающиеся медные проводники большого сечения, создающие импульсное тороидальное магнитное поле, а также электрически взрывающиеся тонкие проволоки для создания плотной плазмы. Принцип действия плазмотрона основан на возбуждении индукционного разряда во время спада магнитного поля в плазме, созданной при электро-взрыве тонких проволок. Показано, что при этом формируются автономные плазменные образования с аномальным послесвечением (около 60 мс). Цель работы заключается в создании импульсного плазмотрона с индукционным разрядом, а также в экспериментальной оценке параметров макета устройства.

Ключевые слова: импульсный плазмотрон, электрический взрыв металла, импульсное магнитное поле, индукционный разряд, долгоживущие автономные плазменные образования.

DOI: 10.21667/1995-4565-2021-78-153-161**Введение**

Исследование автономных плазменных образований (АПО), удаленных как от стенок разрядной камеры, так и от источников энергии, представляется актуальным для создания импульсных источников мощного оптического излучения открытого типа, плазмохимии, испытания устройств грозозащиты, и, кроме того, для моделирования явления шаровой молнии [1]. Для получения АПО используются импульсные плазмотроны с разрядной камерой, в которой электроды подключены к ёмкостному накопителю [2]. Как правило, при импульсном истечении плазменной струи в воздух образуются плазменные тороидальные вихри с высокой светимостью [3]. Если тороидальный плазменный вихрь захватывает магнитное поле, то формируется плазмод – АПО, включающее ограниченную конфигурацию магнитных полей и плазмы, называемое также магнитогидродинамической (МГД) конфигурацией, в которой магнитные силы сравнимы с газодинамическими силами [4]. При этом магнитное поле в МГД-конфигурациях может создаваться тороидальным токовым слоем, расположенным внутри тороидального плазменного вихря [5].

Для получения плотной плазмы удобно использовать электрический взрыв металла при импульсном нагреве [6] и индукционный разряд [7] для дополнительного ввода энергии в плазму. Одним из методов получения плазмодов является электрический взрыв свёрнутых в

тор металлических спиралей [8]. При этом используется метод накопления энергии в индуктивном контуре и передачи её в нагрузку при прерывании первичного тока. Спирали выполняют функции индуктивного накопителя энергии и одновременно прерывателя цепи первичного тока (в момент электровзрыва), а роль объекта, воспринимающего энергию магнитного поля индуктивного накопителя, выполняет формируемый плазменный виток, образовавшийся при взрыве спиралей.

Для экспериментального получения АПО создана электрофизическая установка ИНГИР-Мега-15 [9], [10], которая позволяет получать субмиллисекундные (от 0,05 мс до 0,5 мс) мощные импульсы тока с амплитудой до 400 кА. Однако эксперименты, проведенные с помощью установки, описанной в [9], показали удовлетворительное совпадение экспериментальных результатов с теорией [8] лишь для малоразмерных спиралей. При увеличении размеров проявляются тепловые неустойчивости при электрическом взрыве проволочек [6]. Это обусловило переход к одновитковым спиральям [10], а это, в свою очередь, потребовало существенного увеличения амплитуды первичного тока как минимум до 400 кА, и, кроме того, существенной доработки электрофизического стенда для электрического взрыва металла. Цель настоящей работы заключается в создании импульсного плазмотрона на основе электровзрыва металла с использованием индукционного газового разряда, в экспериментальной оценке параметров макета устройства, а также в получении данных, необходимых для совершенствования техники получения долгоживущих АПО.

Формирование АПО в виде плазменного тороидального вихря

Во время импульсного истечения плазмы в воздух при атмосферном давлении возможно возникновение различных плазменных конфигураций (грибообразной, бочкообразной, шарообразной, плазменного тороидального вихря), последняя из перечисленных характеризуется наибольшим временем жизни (до ~100 мс) [2].

Для экспериментального получения АПО в виде плазменного тороидального вихря может быть использован импульсный плазмотрон [2], конструкция которого приведена на рисунке 1 а, газодинамическая схема формирования плазменного тороидального вихря при импульсном истечении плазмы [3] показана на рисунке 1, б.

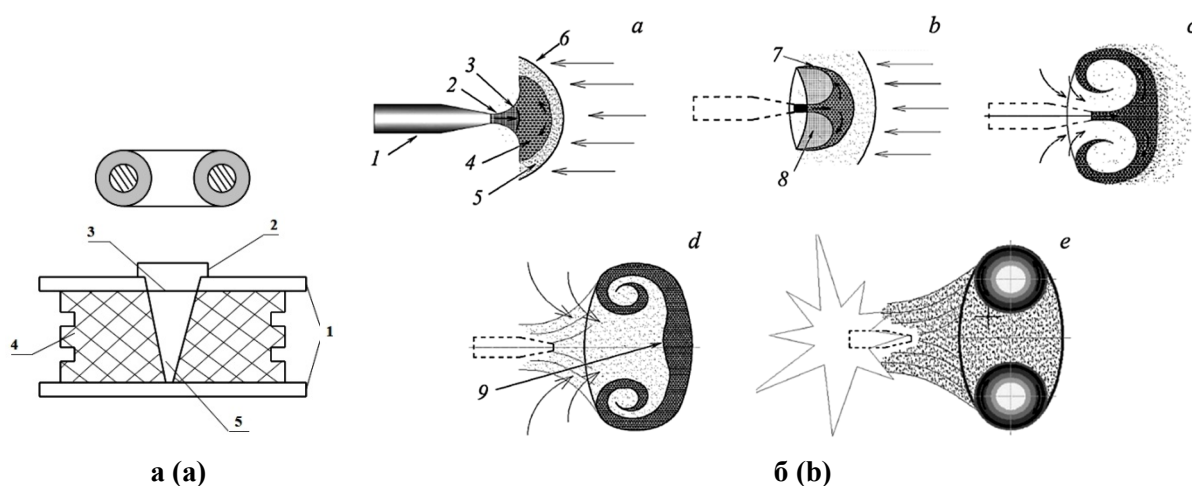


Рисунок 1 – Формирование плазменного тороидального вихря:

а – конструкция импульсного плазмотрона;

б – газодинамическая схема формирования плазменного тороидального вихря

Figure 1 – Plasma toroidal vortex formation: а – construction of a pulsed plasmatron;

б – gas-dynamic scheme of plasma toroidal vortex formation

Типичный импульсный плазмотрон (рисунок 1, а) содержит следующие элементы: 1 – электроды, 2 – сопло, 3 – диафрагма, 4 – изолятор, 5 – разрядная камера. Плазмотрон

подключается к высоковольтной конденсаторной батарее через электроды 1, разрядный ток при этом может достигать значений порядка 450 кА [2].

Процесс формирования плазменного вихря проиллюстрирован на рисунке 1 б, где приняты следующие обозначения: 1 – взрывной генератор плазменных потоков; 2 – плазменный поток; 3 – ударная волна в плазме; 4 – ударно-сжатая плазма; 5 – ударно-сжатый воздух; 6 – ударная волна в атмосферном воздухе; 7 – плазменная пелена; 8 – зона разрежения; 9 – задний фронт плазменной струи. Газодинамическая схема формирования плазменного тороидального вихря содержит следующие стадии: *a* – истечение и ударное торможение плазменного потока, *b* – формирование грибообразной конфигурации и зоны разрежения, *c* – формирование обратного течения и начальной завихренности плазменной пелены, *d* – формирование циркуляции тороидального вихря, *e* – автономный плазменный тороидальный вихрь.

Сформированный плазменный тороидальный вихрь является наиболее долгоживущим АПО, что подтверждается аномально большим временем послесвечения.

Гипотеза о формировании АПО в виде плазмоида при индукционном разряде

Большой интерес представляет получение АПО в виде плазмоида, когда при импульсном истечении плазмы из импульсного плазмотрона создаётся тороидальный плазменный вихрь, в котором за счёт индукционного разряда формируется тороидальный токовый слой (ТТ-слой). Именно в этом случае, согласно теории [5], [8], ожидается существенное увеличение времени жизни АПО, вплоть до уровня единиц и десятков секунд.

Рассмотрим на качественном уровне процесс формирования АПО в виде плазмоида, рисунок 2.

Для простоты будем рассматривать случай, когда магнитное поле создаётся линейным проводником (рисунок 2, *a*), по которому протекает первичный ток I_p , создавая магнитное поле B_p , которое внедряется вовнутрь плазменного вихря, слои которого движутся со скоростью v_g .

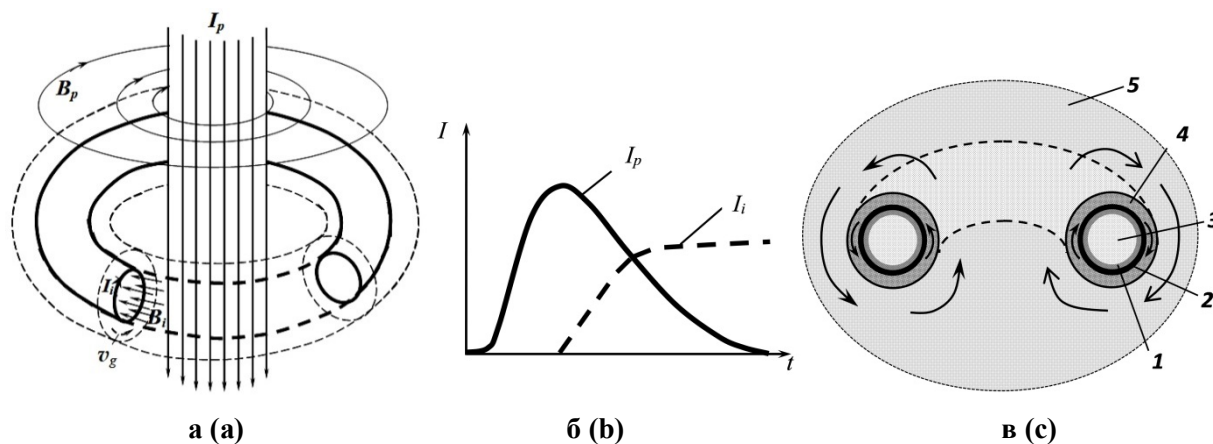


Рисунок 2 – Формирование плазмоида: а – плазменный тороидальный вихрь под действием магнитного поля первичного тока; б – импульс первичного тока; в – плазмод («поперечный разрез»): 1 – фоновые относительно малоподвижные ионы тороидального токового слоя (ТТ-слоя), 2 – коллективизированные быстрые электроны ТТ-слоя; 3 – тороидальное магнитное поле, создаваемое ТТ-слоем, 4 – плазменный вихрь, 5 – светящаяся плазменная малоподвижная оболочка.

Стрелками показано вращательное движение слоёв плазмы

Figure 2 – Plasmoid formation: а – plasma toroidal vortex under the influence of primary current magnetic field; б – impulse of primary current; в – plasmoid («cross section»):

1 – background relatively low-mobile ions of toroidal current layer (ТТ-layer),

2 – collectivized fast electrons of ТТ-layer; 3 - toroidal magnetic field created by ТТ-layer,

4 – plasma vortex, 5 – luminous plasma inactive shell.

The arrows show the rotational motion of plasma layers

Процесс ввода энергии в плазму плазмоида может быть условно разбит на две фазы.

Фаза 1 – период времени, охватывающий начало импульса первичного тока до его максимального значения. На этом этапе (по аналогии с процессами, показанными на рисунке 1, б) формируется плазменный тороидальный вихрь, имеющий скорость слоёв $\mathbf{v}_g$ (рисунок 2, а), плазма в нём нагревается индукционными токами, возникающими при нарастании индукции магнитного поля $\mathbf{B}_p$, создаваемого первичным током I_p . Здесь главную роль играют газодинамические и электромагнитные процессы в низкотемпературной плазме.

Фаза 2 – это период времени, охватывающий период спада магнитного поля. При достаточно быстром спаде первичного тока I_p (рисунок 2, б) внутри плазменного тороидального вихря индуцируется и нарастает вторичный ток I_i за счёт явления взаимной индукции. Вторичный ток I_i создаёт и поддерживает относительно длительное время тороидальное магнитное поле $\mathbf{B}_i$, которое фактически является частью поля $\mathbf{B}_p$, удерживаемого плазменным тороидальным вихрем при спаде первичного тока I_i от максимального значения до нуля. Здесь при хорошо прогретой плазме тороидального вихря (ориентировочно 20000 К и выше) и при достаточно крутом заднем фронте импульса первичного тока (на уровне 100 мкс и менее) в период фазы 2 возможны, в принципе, следующие физические процессы [8]:

- формирование плазменного витка с током I_i в виде тороидальной токовой оболочки аналогично наведённому току во вторичной обмотке тороидального трансформатора, через центр которого по первичной обмотке (в виде провода в рассматриваемом случае) пропускается импульс первичного тока I_p ;

- выкачивание плазмы изнутри плазменного тороидального вихря за счёт сил Лоренца при взаимодействии тока I_p с магнитным полем $\mathbf{B}_i$;

- переход электронов в режим непрерывного ускорения в сильном вихревом электрическом поле, возникающего при быстром спаде поля $\mathbf{B}_p$.

Указанные процессы могут привести к формированию тороидального токового слоя (ТТ-слоя) внутри тороидального плазменного вихря [5], структура которого показана на рисунке 2, в.

Однако если плазма прогрета недостаточно, на выходе импульсного плазмотрона возможно лишь формирование тороидального плазменного вихря, но не плазмоида.

Конструкция макета импульсного плазмотрона на основе электровзрыва металла с использованием индукционного разряда

Конструкция макета импульсного плазмотрона была разработана на основе теоретических и экспериментальных данных [11], [12] с учётом возможностей электрофизической установки ИНГИР-Мега-15. Упрощенная конструкция созданного макета и фото цилиндрической камеры представлены на рисунке 3.

Созданный импульсный плазмотрон содержит полуоткрытую цилиндрическую камеру (рисунок 3, а, б), диаметр которой составляет 76 мм, а длина – 70 мм. На боковых стенках камеры устанавливаются 16 взрывающихся медных проводников большого сечения (1 мм² каждый), и перпендикулярно к ним устанавливаются 8 взрывающихся медных проводочков малого сечения (8 шт., 0,2 мм² каждый).

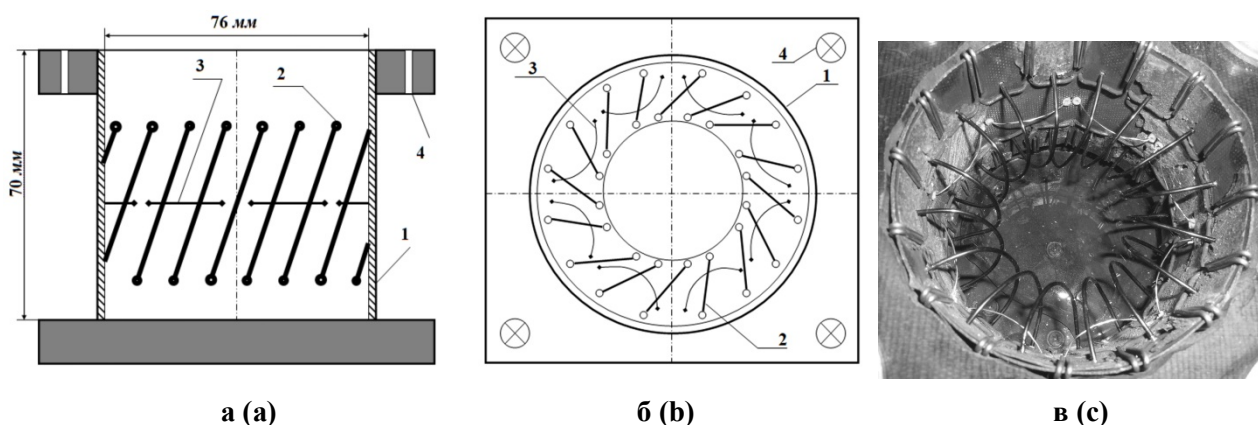


Рисунок 3 – Конструкция макета импульсного плазмотрона:

а и б поперечный разрез и вид сверху, соответственно:

1 – полуоткрытая цилиндрическая камера, 2 – взрывающиеся медные проводники большого сечения, 3 – взрывающиеся медные проволоочки малого сечения,

4 – крепеж (4); в) фото импульсного плазмотрона со стороны вылета плазмы

Figure 3 – Design of pulsed plasmatron model: a and b – cross section and top view, respectively:

1 – semi-open cylindrical chamber, 2 – exploding copper conductors of large cross-section,

3 – exploding copper wires of small cross-section, 4 – fasteners (4); c – photo of pulsed plasma torch from plasma departure side

Экспериментальные исследования

Созданный импульсный плазмотрон устанавливался в электрофизической установке ИНГИР-Мега-15, рисунок 4. Используемая экспериментальная установка содержала следующие блоки: 1 – генератор импульса 400 кА; 2 – генератор импульса 40 кА; 3 – ключ запуска; 4 – линия задержки; 5 – созданный импульсный плазмотрон; 6 – взрывающиеся толстые проводники; 7 – взрывающиеся тонкие проводочки; 8 – измерительно-регистрирующая аппаратура. Блоки 1, 2, 3, 4 и 8 входят в состав электрофизической установки ИНГИР-Мега-15 [12].

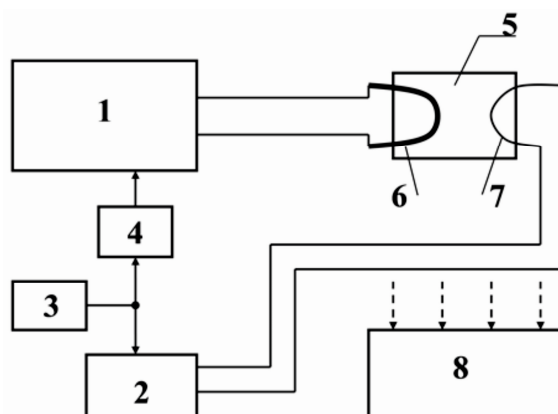


Рисунок 4 – Блок-схема экспериментальной установки

Figure 4 – Block diagram of experimental installation

Принцип действия рассматриваемого импульсного плазмотрона 5 основан на явлении электрического взрыва входящих в состав плазмотрона тонких проводников 7, создающих плотную плазму, на которую действует мощный импульс магнитного поля, создаваемого электрически взрывающимися проводниками большого сечения 6. Образующий при этом плазменный сгусток вылетает со стороны открытого торца цилиндрической камеры, получая энергию как от электрического взрыва проводочек, так и индукционного разряда при быстром спаде импульсного магнитного поля. При благоприятных условиях ожидалось образование плазмоида – плазменного тороидального вихря с захваченным тороидальным магнитным полем.

В процессе эксперимента измерительно-регистрирующей аппаратурой 8 фиксировались осциллограммы токов, напряжения и величина фототока фотоприёмника, входящего в состав электрофизической установки ИНГИР-Мега-15.

Осциллограммы сигналов приведены на рисунке 5.

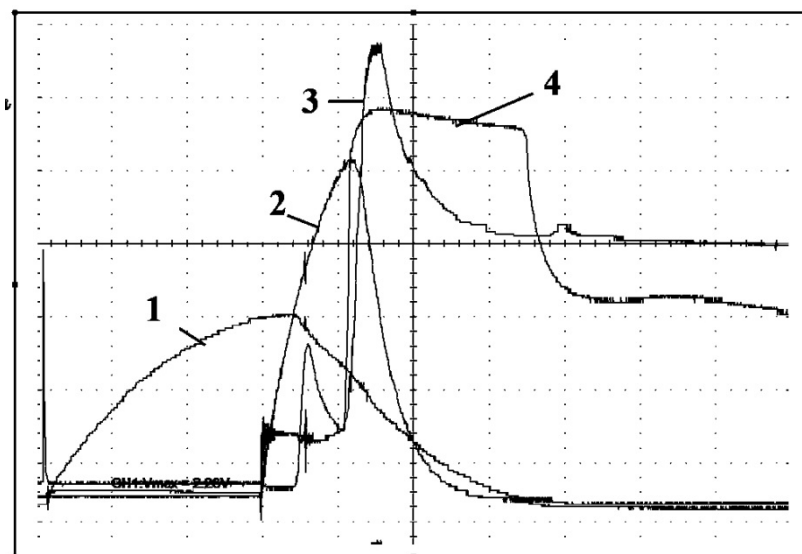


Рисунок 5 – Осциллограммы: 1 – ток через тонкие взрывающиеся проволочки; 2 – ток через взрывающиеся проводники большого сечения; 3 – напряжение на взрывающихся проводниках большого сечения; 4 – сигнал с фотоприёмника
Figure 5 – Oscillograms: 1 – current through thin exploding wires; 2 – current through exploding conductors of large cross-section; 3 – voltage on exploding conductors of large cross-section; 4 – signal from a photodetector

Как видно из приведенных осциллограмм (рисунок 5), вначале подавался импульс разогревающего тока (1) на взрывающиеся проводники малого сечения, и лишь через 300 мкс подавался импульс первичного тока (2) на взрывающиеся проводники большого сечения, после взрыва которых наблюдался всплеск напряжения (3) при спаде тока (2) в контуре разряда. Сигнал фототока (4) показал, что световое излучение наблюдалось и после обнуления токов (1) и (2).

Параметры были следующие: пиковое значение первичного тока (осциллограмма 2, рисунок 5) составляло 382 кА, длительность импульса на уровне 0,1 – 200 мкс, пиковое напряжение (осциллограмма 3) – 700 В; пиковое значение разогревающего тока (осциллограмма 1) – 38 кА, длительность – 500 мкс.

Процессы формирования и эволюции АПО фиксировались видеокамерой с частотой 240 кадров в секунду, некоторые из видеок кадров показаны на рисунке 6.

На основе анализа видеозаписи (рисунок 6) видно, что на выходе исследуемого импульсного плазмотрона действительно получилось автономное плазменное образование (АПО). Полное время свечения плазмы составило 60 мс, однако интенсивное световое излучение наблюдалось лишь в течении периода времени около 40 мс. На трёх последних кадрах (рисунок 6) отчётливо видно, что полученное АПО представляет собой плазменный торoidalный вихрь. Однако плазмoид в этом эксперименте не был получен, судя по относительно небольшому времени интенсивного свечения (40 мс). Это на два порядка меньше, чем ожидаемое время жизни плазмoида. Причиной, скорее всего, служит недостаточный прогрев плазмы.

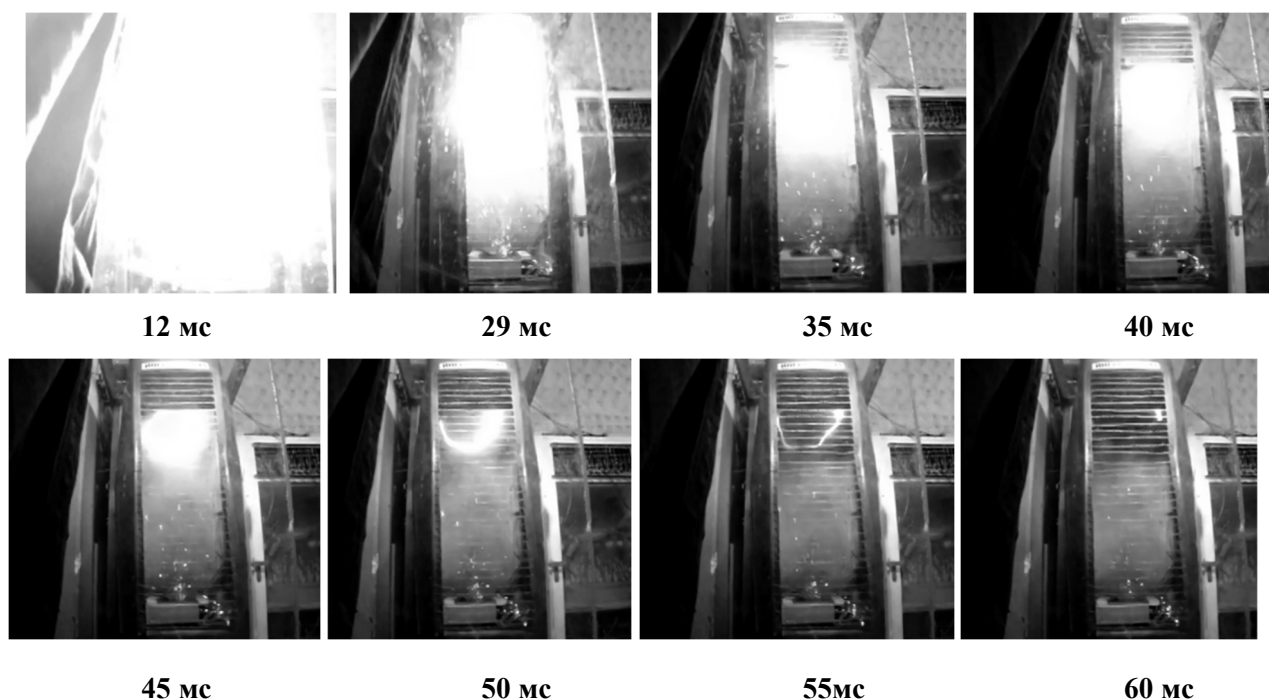


Рисунок 6 – Кадры видеосъёмки процесса формирования и эволюции автономного плазменного образования. Цифрами указано время от начала процесса формирования

Figure 6 – Video footage of the process of autonomous plasma object formation and evolution.

The numbers indicate the time from the beginning of formation proces

Заключение

В настоящей работе была поставлена и решена задача по созданию импульсного плазмотрона с индукционным разрядом для получения автономных плазменных образований. Созданный импульсный плазмотрон имеет полуоткрытую цилиндрическую камеру, в которой методом электрического взрыва создаётся плотная плазма в сильном импульсном тороидальном магнитном поле, которая затем вылетает из открытого торца камеры. Как показали проведенные экспериментальные исследования, на выходе созданного импульсного плазмотрона формируются автономные плазменные образования, представляющие собой долгоживущие плазменные тороидальные вихри.

В данной работе на качественном уровне было показано, что в импульсном плазмотроне с индукционным разрядом имеется принципиальная возможность формирования плазмоида, представляющего собой плазменный тороидальный вихрь с захваченным тороидальным магнитным полем, удерживаемым тороидальным токовым слоем. В этом случае могло бы наблюдаться автономное плазменное образование со временем жизни на уровне нескольких секунд, что намного превышает время жизни, полученное в проведенных экспериментах (~60 мс). По всей видимости, в созданном импульсном плазмотроне плазма недостаточно прогревается для осуществления процесса формирования тороидального токового слоя. Поэтому вопросу первоначального нагрева плазмы следует уделить особое внимание при дальнейшем усовершенствовании конструкции созданного импульсного плазмотрона.

Созданный импульсный плазмотрон предполагается использовать для изучения плазмохимических реакций при действии сильного импульсного магнитного поля, а также для напыления металлических плёнок на поверхность различных материалов при воздействии на них автономными плазменными образованиями, формируемыми созданным импульсным плазмотроном.

Использованная в данной работе электрофизическая установка ИНГИР-Мега-15 была создана при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, государственный контракт № 14.518.11.7002 от 19 июля 2012 г.

Библиографический список

1. **Фуров Л. В.** Получение автономных долгоживущих плазменных образований в свободной атмосфере // Журнал технической физики. 2005. Том 75. Вып. 3. С. 98-101.
2. **Александров А. Ф., Тимофеев И. Б., Черников В. А., Юсупалиев У.** Плазменный тороидальный вихрь в воздухе // Теплофизика высоких температур. 1988. Том 26. № 4. С. 639-643.
3. **Буланов С. С., Есиев Р. У., Камруков А. С., Козлов Н. П., Морозов М. И., Росляков И. А.** Взрывные плазменно-вихревые источники оптического излучения // Журнал технической физики. 2010. Том 80. Вып. 11. С. 87-94.
4. **Шафранов В. Д.** О равновесных магнитогидродинамических конфигурациях // ЖЭТФ. 1957. Т. 33. С. 710-722.
5. **Власов А. Н.** О возможности формирования тороидального токового слоя при искровом разряде // ЖЭТФ. 1990. Т. 97. С. 468-475.
6. **Мартынюк М. М.** Фазовые переходы при импульсном нагреве. Монография. М.: Изд-во РУДН, 1999. 332 с.
7. **Райзер Ю. П.** Физика газового разряда. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2009. 736 с.
8. **Власов А. Н.** Индукционный разряд для получения долгоживущих плазматронов // Вестник Рязанского радиотехнического университета. 2012. № 39-2. С. 108-121.
9. **Власов А. Н., Дубков М. В., Буробин М. А., Жимолоскин С. В., Манюшкин А. Б.** Экспериментальная установка «ИНГИР-МЕГА-15» для получения и исследований индукционного разряда // Вестник Рязанского радиотехнического университета. 2013. № 1 (43). С. 90-94.
10. **Власов А. Н., Дубков М. В., Буробин М. А., Манюшкин А. Б., Жимолоскин С. В.** Модернизация установки «ИНГИР-Мега-15» для получения пикового тока до 400 кА // Вестник Рязанского радиотехнического университета. 2014. № 4 (Часть 2). С. 101-106.
11. **Власов А. Н., Жимолоскин С. В., Манюшкин А. Б., Николаев А. В., Панин В. В., Поташевский С. С.** Об особенностях индуктивных накопителей энергии в экспериментальной установке «ИНГИР-Мега-15» // Вестник Рязанского радиотехнического университета. 2013. № 2 (44). С. 101-106.
12. **Власов А. Н., Дубков М. В., Буробин М. А., Манюшкин А. Б., Николаев А. В. и др.** (всего 10 человек). Проведение исследований индукционного разряда при быстром спаде сильного магнитного поля в горячей плазме с использованием установки типа «ИНГИР-Мега», имеющей индуктивный накопитель для генерирования индукционного разряда при накачке мегаваттными импульсами // Отчет о НИР (заключ.): 28-12 / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; рук. Власов А. Н. Рязань. 2013. № ГР 01201272674. Инв. № 02201450296.

UDC 537.523

CREATION AND RESEARCH OF PULSE PLASMATRON WITH INDUCTION DISCHARGE FOR PRODUCING AUTONOMOUS PLASMA FORMATIONS

A. N. Vlasov, Dr. Sc. (Tech.), full professor, department of general and experimental physics, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0002-6298-0433, e-mail: oief@rsreu.ru

M. V. Dubkov, Dr. Sc. (Tech.), full professor, head of the Department of general and experimental physics, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0002-5791-0991, e-mail: oief@rsreu.ru

Yu. V. Cherkasova, Ph.D. (Tech.), associate professor, department of general and experimental physics, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0003-2474-3629, e-mail: oief@rsreu.ru

A. V. Nikolaev, senior lecturer, department of general and experimental physics, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0001-7603-7094, e-mail: oief@rsreu.ru

*A prototype of a pulsed plasmatron containing semi-open cylindrical chamber with electrically exploding copper conductors of large cross-section creating pulsed toroidal magnetic field, as well as electrically exploding thin wires to create dense plasma being installed has been created and researched. The principle of operation of the plasmatron is based on excitation of an induction discharge during the decay of magnetic field in plasma created by electric explosion of thin wires. The authors have shown that in this case, autonomous plasma formations with anomalous afterglow (about 60 ms) are formed. **The aim of the work** is to create a pulsed plasmatron with an inductive discharge, as well as to experimentally estimate the parameters of device prototype.*

Key words: pulsed plasmatron, metal electric explosion, pulsed magnetic field, induction discharge, long-lived autonomous plasma formations.

DOI: 10.21667/1995-4565-2021-78-153-161

References

1. **Furov L. V.** Poluchenie avtonomnykh dolgozhivushchikh plazmennyykh obrazovaniy v svobodnoy atmosfere. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2005, vol. 75, no. 3, pp. 98-101. (in Russian).
2. **Aleksandrov A. F., Timofeev I. B., Chernikov V. A., Yusupaliev U.** Plazmennyy toroidal'nyy vihr' v vozduhe. *Teplofizika vysokikh temperatur*. 1988, vol. 26, no. 4, pp. 639-643. (in Russian).
3. **Bulanov S. S., Esiev R. U., Kamrukov A. S., Kozlov N. P., Morozov M. I., Roslyakov I. A.** Vzryvnye plazmenno-vihrevyye istochniki opticheskogo izlucheniya. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2010, vol. 80, no. 11, pp. 87-94. (in Russian).
4. **Shafranov V. D.** O ravnovesnykh magnitogidrodinamicheskikh konfiguratsiyah. *ZHETF*. 1957, vol. 33, pp. 710-722. (in Russian).
5. **Vlasov A. N.** O vozmozhnosti formirovaniya toroidal'nogo tokovogo sloya pri iskrovom razryade. *ZHETF*. 1990, vol. 70, no. 2, pp. 259-262. (in Russian).
6. **Martynyuk M. M.** *Fazovye perekhody pri impul'snom nagreve. Monografiya*. Moscow: Publishing house of RUDN, 1999. 332 p. (in Russian).
7. **Raizer Yu. P.** *Fizika gazovogo razryada*. Dolgoprudny: Intellect Publishing House. 2009. 736 p. (in Russian).
8. **Vlasov A. N.** Indukcionnyy razryad dlya polucheniya dolgozhivushchikh plazmoidov. *Vestnik Ryazanskogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2012, no. 39-2, pp. 108-121. (in Russian).
9. **Vlasov A. N., Dubkov M. V., Burobin M. A., Zhimoloskin S. V., Manoshkin A. B.** Eksperimental'naya ustanovka «INGIR-MEGA-15» dlya polucheniya i issledovaniy indukcionnogo razryada. *Vestnik Ryazanskogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2013, no. 1 (43), pp. 90-94. (in Russian).
10. **Vlasov A. N., Dubkov M. V., Burobin M. A., Manoshkin A. B., Zhimoloskin S. V.** Modernizatsiya ustanovki «INGIR-Mega-15» dlya polucheniya pikovogo toka do 400 kA. *Vestnik Ryazanskogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2014, no. 4 (Part 2), pp. 101-106. (in Russian).
11. **Vlasov A. N., Zhimoloskin S. V., Manoshkin A. B., Nikolaev A. V., Panin V. V., Potashevsky S. S.** Ob osobennostyakh induktivnykh nakopiteley energii v eksperimental'noy ustanovke «INGIR-Mega-15». *Vestnik Ryazanskogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2013, no. 2 (44), pp. 101-106. (in Russian).
12. **Vlasov A. N., Dubkov M. V., Burobin M. A., Manoshkin A. B., Nikolaev A. V. and others (10 people in total).** Provedenie issledovaniy indukcionnogo razryada pri bystrome spade sil'nogo magnitnogo polya v goryachej plazme s ispol'zovaniem ustanovki tipa «INGIR-Mega», imeyushchey induktivnyy nakopitel' dlya generirovaniya indukcionnogo razryada pri nakachke megavattnymi impul'sami. Otchet o NIR (zaklyuch.): 28-12 / Ryazan. gos. radiotekhn. un-t; ruk. Vlasov A.N. Ryazan'. 2013, no. GR 01201272674. Inv. no. 02201450296. (in Russian).